

METALL-KÖRNER SPEICHERN ENERGIE

Gehen Metalle eine Verbindung mit Sauerstoff ein, so werden enorme Energiemengen freigesetzt. Daher können Aluminium und andere Metalle dazu verwendet werden, um erneuerbaren Strom zu speichern, um daraus im Winter Wärme und Strom zu gewinnen. Forschende der Ostschweizer Fachhochschule haben evaluiert, welche Metalle zur Einspeicherung, Lagerung und Ausspeicherung von Energie besonders geeignet sind und in welchem Mass sie zur Deckung der Winterenergielücke durch erneuerbare Energie beitragen könnten.

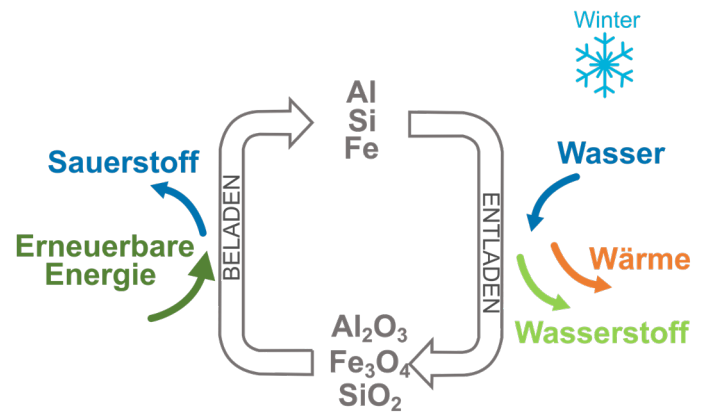


Aluminium-Granulat für die Produktion von Wärme und Wasserstoff im Winter, mit einer Energiespeicherdichte von über 15 MWh pro m³ Schüttgut. Foto: jebe-arts.ch.

Mit dem Ausbau der Photovoltaik dürfte in den Sommermonaten mehr Solarstrom anfallen, als tagesaktuell benötigt wird. Zudem gibt es Länder, wo ganzjährig viel erneuerbare Energie produziert werden kann, zum Beispiel Island (Geothermie und Wasserkraft) oder Marokko (Solarstrom). Mit einem geeigneten Energiespeicher könnten solche Überschüsse an erneuerbarer Energie im Idealfall zur Deckung des Strom- und Wärmebedarfs im Winter herangezogen werden.

Dieses Ziel verfolgt ein Team der Ostschweizer Fachhochschule (OST) seit einigen Jahren mit der Entwicklung eines Energiespeicherzyklus auf der Basis von Metall als erneuerbarer Energieträger. Dabei wird Strom in chemischer Form im Metall gespeichert, und die Energie wird im Winter in Form von Wärme (im Temperaturbereich von 60 bis 70 °C) und Strom wieder freigesetzt. An der OST wird mit Aluminium als Speichermedium gearbeitet. Dieses kann in seiner oxidierten Form (Aluminiumoxid) Strom aufnehmen: Dabei wird Sauerstoff abgespalten und es entsteht Aluminium. «Darin lässt sich Energie über lange Zeiträume verlustfrei speichern und transportieren, bevor das Metall die Energie in einem Oxidationsprozess in Form von Wärme und Strom wieder abgibt und sich dabei wieder mit Sauerstoff verbindet», sagt Michel Haller, Leiter der Forschung am SPF Institut für Solartechnik der OST.

Um den Wärme- und Strombedarf eines Einfamilienhauses sicherzustellen, braucht es nach Berechnungen der Forschenden eine PV-Anlage mit 60 m² Fläche (10 kW_p) und einen Aluminium-Speicher in der Grösse einer Waschmaschine



Schematische Darstellung der saisonalen Energiespeicherung auf der Basis eines Metalls: Im Sommer (links) wird der Speicher mit erneuerbarem Strom geladen, wobei von Aluminium-, Eisen- oder Siliziumoxid Sauerstoff in einem Reduktionsprozess abgespalten wird. Im Winter (rechts) werden aus dem Speicher Wärme und Strom bezogen. Grafik: SPF

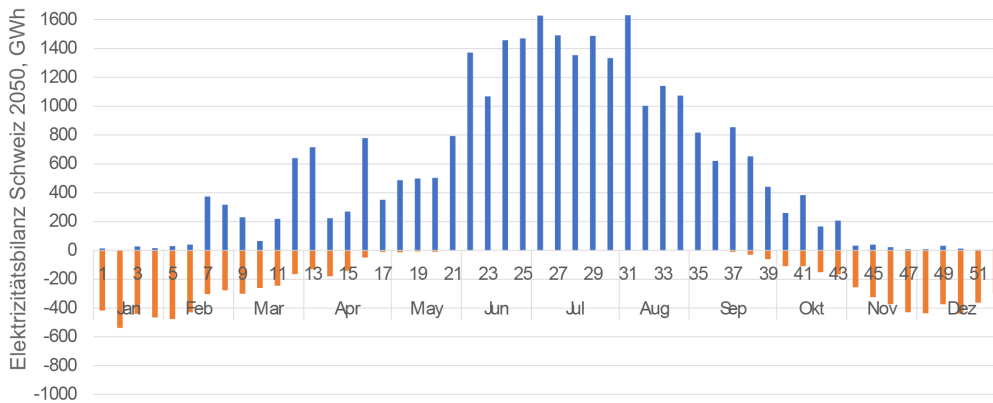
(vgl. Fachartikel «Aluminium bringt die Sonne in den Winter», <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/9796>). An der OST wird derzeit im Rahmen des Projekts REVEAL (www.reveal-storage.eu) ein Demonstrator für die Produktion von Wärme und Strom mit einer Gesamtleistung von 4 kW gebaut. Das Projekt wird von der Europäischen Union und dem Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation gefördert.

Aluminium, Eisen und Silizium

In einem neuen Forschungsprojekt haben Forscherinnen und Forscher der OST mit finanzieller Unterstützung des BFE nun



OST-Wissenschaftlerin Yvonne Bäuerle hat das PeakMetal-Projekt geleitet. Foto: OST

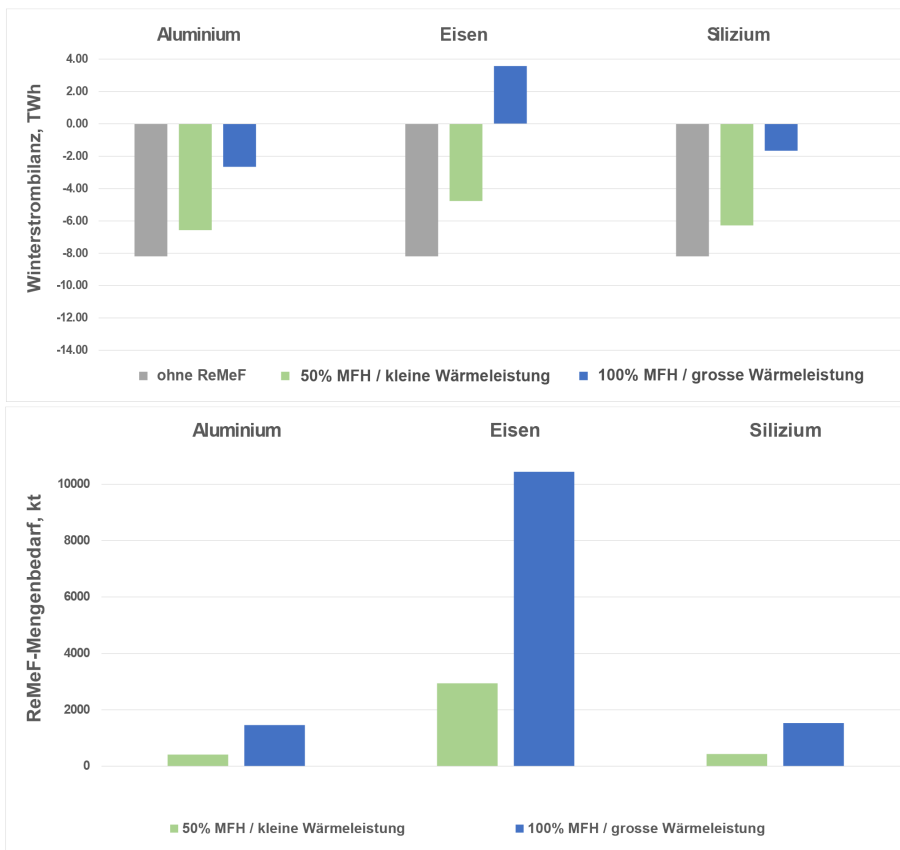


In einer Schweiz mit stark ausgebauten PV-Anlagen ergibt sich von April bis September ein Solarstrom-Überschuss von 25.5 TWh. Die Stromlücke im Winter (Oktober bis März) summiert sich im dargestellten Szenario auf 8.2 TWh, wenn man davon ausgeht, dass kurzfristige Speicherung Überschüsse und Defizite innerhalb einer Woche bereits ausgleicht. Grafik: SPF

das Potenzial Metall-basierter Speichertechnologien generell untersucht. Im Zentrum stand zum einen die Frage, welche Metalle neben Aluminium als Speichermedium genutzt werden könnten. Hierbei wurden mit einer Multikriterienanalyse sowie Lebenszyklusanalysen möglichst umweltfreundliche, aber auch gut verfügbare und kostengünstige Metalle identifiziert. Zum anderen wurden Berechnungen durchgeführt, um zu ermitteln, ob bzw. in welchem Mass diese Speichertechnologie zur Deckung der Winterenergielücke beitragen könnte, die gegenwärtig breit diskutiert wird. Gemeint ist damit das Problem, dass sich mit einem starken Ausbau der

Photovoltaik zwar der Strombedarf in den Sommermonaten decken liesse, in den Wintermonaten aber nach wie vor eine Versorgungslücke bleiben würde.

Die Arbeiten der SPF-Forschenden haben ergeben, dass neben Aluminium auch Eisen und Silizium vielversprechende Speichermedien sind. Dazu heisst es im Projektschlussbericht: «Die Hauptvorteile sind ihre hohe Verfügbarkeit – sie sind neben Sauerstoff die häufigsten Elemente in der Erdkruste –, ihre geringen Kosten und ihre einfache Handhabung, da sie weder giftig noch hochreaktiv sind.»



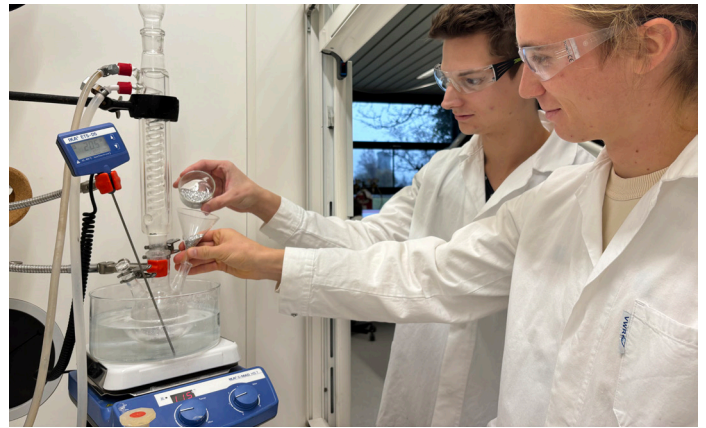
Grafik oben: Bei einem Szenario mit einem starken Ausbau der Photovoltaik und Wärmepumpen wird in der Schweiz im Jahr 2050 eine Winterstromlücke von gut 8 TWh erwartet (graue Säulen). Diese lässt sich durch den Einsatz von Wärme- und Stromproduktion auf der Basis von Metallen (ReMeF) verringern: In der Modellrechnung werden die Hälfte (grüne Säulen) bzw. alle Mehrfamilienhäuser (blaue Säulen) mit Metallspeichern ausgerüstet, wobei die Speicher im ersten Fall eine geringe Wärmeleistung haben und im zweiten Fall eine grosse Wärmeleistung. Im besten Fall (alle Mehrfamilienhäuser mit einem grossen saisonalen Speicher auf der Basis von Eisen ausgestattet) würde die Stromlücke nicht nur kompensiert, sondern es könnten im Winter sogar noch 2 bis 4 TWh Strom exportiert werden. Zum Vergleich: heute importiert die Schweiz insgesamt 200 TWh an Energieträgern (Erdölprodukte, Erdgas, Uran) pro Jahr. Grafik: SPF

Grafik unten: Materialbedarf (in Kilotonnen/kt) für das Speichersystem auf der Grundlage von Metallen (ReMeF) für zwei Szenarien: Im ersten Szenario (grün) wird schweizweit jedes zweite Mehrfamilienhaus mit einem Speicher mit geringer Wärmeleistung ausgerüstet. Im zweiten Szenario (blau) werden alle Mehrfamilienhäuser mit einem Speicher ausgerüstet, die alle über eine grosse Wärmeleistung verfügen. Grafik: SPF

Jedes Metall hat Stärken und Schwächen

Aluminium, Eisen und Silizium eignen sich technisch als saisonale Energiespeicher. Die im Metall gespeicherte Energie kann durch eine Reaktion mit Wasser freigesetzt werden, wobei – abhängig von der Temperatur – ein Metalloxid oder -hydroxid und Wasserstoff entstehen. Dabei hat jedes Material seine Vor- und Nachteile, wie die Studie zeigt. Ein Vorteil von Eisen ist, dass bei der Oxidation mit Wasser nur wenig oder keine Wärme entsteht und die gespeicherte Energie vollständig auf den produzierten Wasserstoff übertragen wird. Dieser kann in einer Brennstoffzelle zu 50% in Strom umgewandelt werden, der Rest wird als Wärme frei. Bei der Wasserstoffherzeugung aus Wasser und Aluminium hingegen werden ca. 50% der im Metall enthaltenen Energie in Wärme umgewandelt und 50% stehen als Wasserstoff zur Verfügung. Daraus resultiert ein Verhältnis von ca. 75% Wärme und 25% Strom.

Aluminium und Silizium haben im Gegenzug eine deutlich höhere Energiedichte als Eisen. Das hat den Vorteil, dass die Energiespeicherung weniger Material und Volumen benötigt und geringere Transportkosten verursacht. Der von den SPF-Forschenden errechnete Gesamt-Wirkungsgrad von er-



Studierende der OST ermitteln im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten die Reaktionsfreudigkeit von Aluminium-Granulat und den dabei entstehenden Wasserstoff. Foto: OST-UMTEC.

neuerbarem Strom hin zu Strom und Wärme liegt für alle Metalle im Bereich von 50 - 60%. Anders formuliert: Bei seiner saisonalen Speicherung von erneuerbarem Strom kann im Winter etwas mehr als die Hälfte wieder in Strom oder Wärme umgewandelt werden.

WIE DER ALUSPEICHER FÜR EIN HAUS FUNKTIONIEREN WÜRD

Durch Einsatz eines Aktivators (z.B. Natronlauge) wird eine chemische Reaktion ausgelöst, bei der Aluminium Wasser spaltet, Sauerstoff bindet und unter Abgabe von Wärme zu Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) und Wasserstoff (H_2) reagiert. Die Wärme wird mittels Wärmetauscher für Raumheizung und Warmwasser genutzt, der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle in Strom und Wärme umgewandelt. Auf dem Weg lassen sich aus 500 Kilogramm Aluminium 3'000 kWh Wärme und 1'000 kWh Strom gewinnen, was den Speicherbedarf eines Einfamilienhauses mit Photovoltaik und Wärmepumpe deckt.

Das Aluminiumhydroxid kann in einem zweistufigen Prozess unter Zuführung von erneuerbarem Strom – zum Beispiel Solarstrom – wieder in Aluminium umgewandelt werden. Dieser Prozess kann wegen der hohen Temperaturen von über 700 °C und des dabei eingesetzten Elektrolyten (geschmolzener Kryolith) nicht im Einfamilienhaus stattfinden. Das Aluminiumhydroxid muss vielmehr in eine zentrale Anlage gebracht werden. Eine technische Herausforderung besteht darin, diesen zweistufigen Prozess ohne Freisetzung von CO_2 durchzuführen, was die isländischen Partner der OST im EU-Projekt REVEAL im Labormasstab bereits demonstriert haben.

Der Speicher-Zyklus mit Aluminium oder anderen Metallen ist chemisch gesehen vergleichbar mit dem, was in einer Batterie abläuft: Energie wird gespeichert, indem der Oxidationszustand (elektrische Ladung) eines Metalls verändert wird (RedOx-Reaktion). Im Unterschied zu den meisten Batterien dient hier Wasser oder Sauerstoff als Oxidationsmittel, während bei Batterien in der Regel andere Oxidationsmittel zum Einsatz kommen. Weil bei der Entladung des Speichers gegenüber einer Batterie auf den komplexen Aufbau mit Anode, Kathode und Elektrolyt verzichtet wird, können sowohl Kosten als auch Volumen je um einen Faktor 10 oder mehr reduziert werden, was diese Speichertechnik sowohl für die längerfristige (saisonale) Speicherung als auch für längere Transportdistanzen in den Bereich der Wirtschaftlichkeit rückt.

Alternativen ohne Kohlenstoff

Eine Herausforderung, die allen drei Metallen gemeinsam ist: Bei der «Beladung» der Speicher mit erneuerbarem Strom – chemisch gesehen eine Reduktion der Metalloxide – wird in den heute industriell genutzten Verfahren Kohlenstoff als Reduktionsmittel eingesetzt. Der von den Metalloxiden abgespaltete Sauerstoff verbindet sich dabei mit dem Kohlenstoff zu CO_2 . Dies führt zu Emissionen, die vor dem Hintergrund der Klimadebatte unerwünscht sind. Um dies zu vermeiden, verfolgt die Metallindustrie ambitionierte Klimaziele. Weltweit wird an alternativen Verfahren zur CO_2 -freien Herstellung von Aluminium und Eisen gearbeitet. Für Eisen bietet sich die direkte Reduktion mit erneuerbarem Wasserstoff an, bei Aluminium und Silizium die Nutzung von Inert-Elektroden an Stelle von Kohleelektroden. Am weitesten fortgeschritten ist die direkte Reduktion mit Wasserstoff bei Eisen. Die Technologie ist bereits erprobt und befindet sich im Upscaling (Technologie-Reifegrad von 6/7 auf 8/9). Im bereits erwähnten Projekt REVEAL entwickeln Partner in Island die CO_2 -freie Produktion von Aluminium aus Aluminiumoxid.

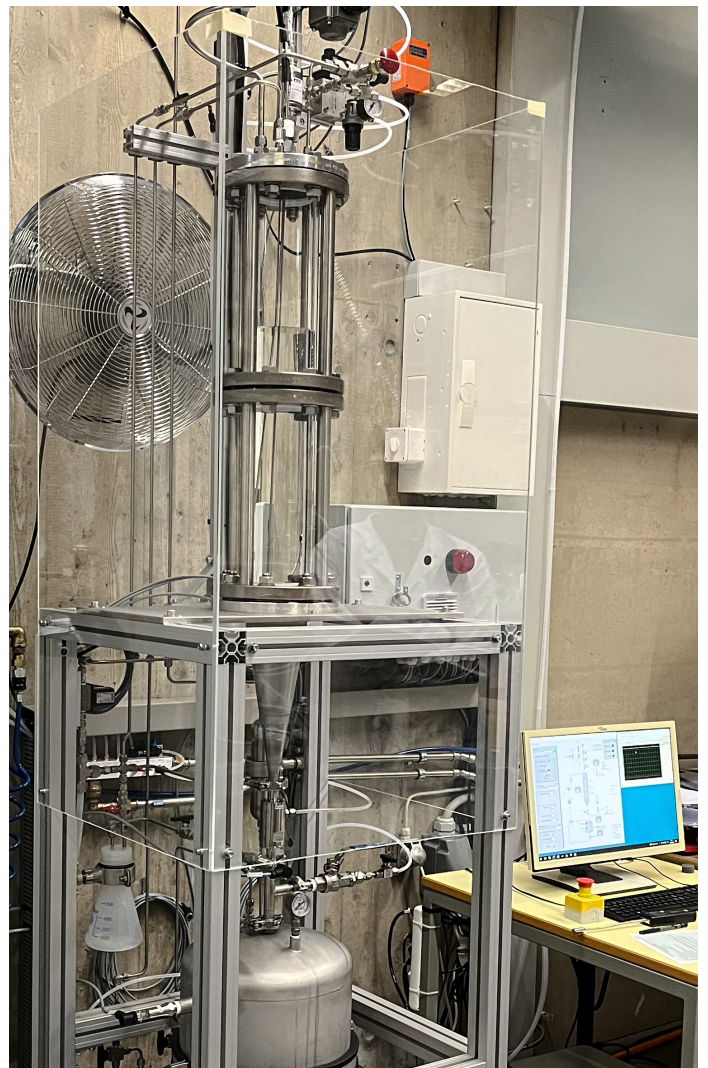
«Aufgrund der Studie sind wir davon überzeugt, dass kurz- bis mittelfristig marktfähige «Metall-Speicherzyklen» aus Aluminium und Eisen zum Einsatz kommen werden», sagt SPF-Forscherin Yvonne Bäuerle, und ergänzt: «Die Umsetzung der saisonalen Energiespeicherzyklen könnte einen wesentlichen Beitrag zur Deckung der Winterenergielücke leisten.» Ausgehend von den Energieperspektiven 2050+ wurden am SPF verschiedene Szenarien des Schweizer Energiesystems im Jahr 2050 simuliert. Selbst bei massivem Ausbau der Photovoltaik auf 45 TWh/a (derzeit 6 TWh/a) wird im Jahr 2050 voraussichtlich eine Winterstromlücke von 8 bis 9 TWh_{el} verbleiben. Nimmt man nun an, dass von den 500'000 Schweizer Mehrfamilienhäusern ein wesentlicher Teil mit einer Metall-Energie-Umwandlungsanlage von 10 kW Wärmeleistung ausgestattet wird und der in den Liegenschaften nicht benötigte Strom ins Netz eingespeist wird, so kann durch den Einsatz von Aluminium oder Silizium als Energieträger die Winterlücke von gut 8 TWh_{el} auf 2 bis 3 TWh_{el} reduziert werden. Bei der Nutzung von Eisen könnte die Lücke sogar vollständig geschlossen werden; die Schweiz wäre dann sogar in der Lage, im Winter Strom zu exportieren.

Neue Energielogistik

Um dieses saisonale Speicherpotenzial zu realisieren, müsste eine Transportlogistik aufgebaut werden, um Energiespeichermetalle im Umfang von mehreren Millionen Tonnen (vgl.



SPF-Forschungsleiter Michel Haller mit einer Probe Aluminium, welche von den isländischen Partnern unter Einsatz von Inert-Elektroden (d.h. ohne CO_2 -Emissionen) hergestellt wurde. Foto: SPF



Labor-Prototyp für 2 kW Wärme und 2 kW Wasserstoffleistung aus Aluminium am SPF Institut für Solartechnik der OST. Foto: SPF

Abbildung S. 3 unten) in Grossanlagen in der Schweiz oder im Ausland zu transportieren und von Neuem mit erneuerbarem Strom beladen zu können, sowie um die Metalle anschliessend wieder in die Haushalte zurückzutransportieren. Zum Vergleich: Heute werden jährlich 9 Mio. t Erdöl in die Schweiz importiert.

Derzeit findet die Entwicklung des Energiespeicherzyklus auf der Basis von Aluminium hauptsächlich innerhalb des Projekts REVEAL statt. Aus diesen Entwicklungen wurde ein Start-Up gegründet, welches die Technologieentwicklung auch für Investoren zugänglich machen soll.

- Der **Schlussbericht** zum Projekt «Covering Winter Peaks of Heat and Electricity Demand by Renewable Metal Fuels» (PeakMetal) ist abrufbar unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51622>.
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Nadège Vetterli (nadege.vetterli@anex.ch), externe Leiterin des BFE-Forschungsprogramms Gebäude und Städte.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Gebäude und Städte finden Sie unter
www.bfe.admin.ch/ec-gebaeude.
- Am 12./13. Februar 2025 findet an der OST in Rapperswil das erste internationale **Symposium** «Renewable Metal Fuels» (ReMeF) statt:
<https://www.reveal-storage.eu/remef>